

УДК 622.691

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЬ ВИТОКУ ПОВІТРЯ НА ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ТРУБОПРОВОДІ

*Л.М. Заміховський, Л.О. Штаєр, В.А. Ровінський*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, м Івано-Франківськ, 76019, тел. (03422)48000,  
e-mail: [ktsu.nung@gmail.com](mailto:ktsu.nung@gmail.com)*

*Проведено польові дослідження методу контролю витоків в стінках технологічного трубопроводу акустичними хвилями, збудженими в повітрі, яке заповнює трубопровід. Встановлено результативність вказаного методу, що підтверджено експериментальними результатами аналізу відбитих від неоднорідностей стінок сигналів.*

*Ключові слова: трубопровід, витoki в трубопроводах, акустичні коливання, польові експериментальні дослідження.*

*Проведены полевые исследования метода контроля утечек в стенках технологического трубопровода акустическими волнами, возбужденными в воздухе, заполняющем трубопровод. Установлено результативность указанного метода, что подтверждено экспериментальными результатами анализа отраженных от неоднородности стенок сигналов.*

*Ключевые слова: трубопровод, утечки в трубопроводах, акустические колебания, полевые экспериментальные исследования.*

*The field researches of technological wall's pipeline leak control method are conducted by acoustic waves which generated in pipeline medium (air). Effectiveness of the indicated method is set, that is confirmed the experimental results of signals reflected analysis from wall heterogeneity.*

*Keywords: pipeline, pipeline leaks, acoustic waves, field experimental researches.*

Вирішення проблеми забезпечення безаварійного функціонування газотранспортних систем передбачає підвищення надійності трубопроводів. Неможливість оперативного виявлення наскрізного отвору в стінці трубопроводу (в т.ч. несанкціонованих врізок) і його локалізації призводить до значних екологічних та економічних втрат.

Методи, які найчастіше застосовуються в системах виявлення витоків, розглянуто в [1]. Перспективними є методи, які вимагають однієї точки доступу до трубопроводу для підключення датчиків з метою виявлення витоків [2-4]. Загальними проблемами способів реалізації методів виявлення витоків є: високий ступінь загасання акустичних коливань в металі стінок трубопроводу, який покритий теплоізоляційною оболонкою, що характеризується високими вібропоглинаючими властивостями; методи реєстрації акустичних коливань мають низьку чутливість до малих витоків, яка обумовлена тим, що тиск в трубопроводах, як правило, на кілька порядків більший за значення амплітуди хвилі розрідження і неможливістю відрізнити

експлуатаційні збурення тиску від збурень, які викликані появою витoku. Аналіз опублікованих даних та результати виконаних авторами досліджень дозволили розробити метод виявлення витoku з трубопроводу [5], який базується на створенні додаткових (тестових) акустичних коливань в трубопроводі та обробленні відбитих від неоднорідностей (різкі повороти, місця відведення, встановлення клапанів, витoki та інш.) в стінках цього трубопроводу сигналів. Математичні основи розробленого методу та результати експериментальних досліджень з використанням лабораторного стенда представлено в [6]. Наступним етапом було проведення експериментальних досліджень в польових умовах.

Метою даного дослідження є експериментальне встановлення відповідності між місцем локалізації неоднорідності по довжині трубопроводу та амплітудою локальних максимумів взаємкореляційної функції реєстрованого акустичного сигналу і тестового в польових умовах. Для розв'язання поставленої задачі була розроблена методика проведення експериментальних досліджень та проведені

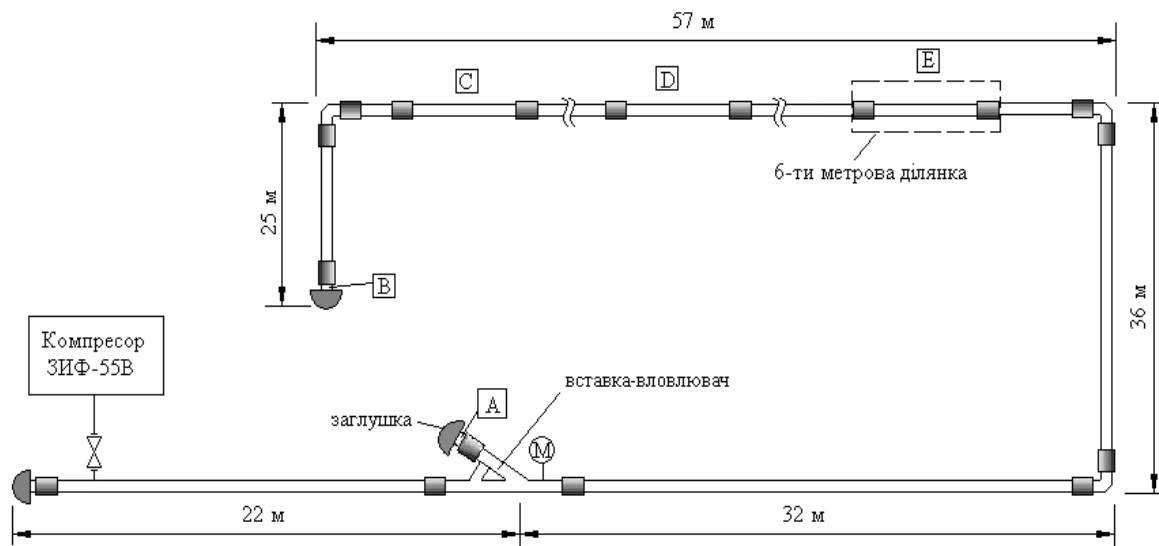
вимірювання на полігоні кафедри військової підготовки ІФНТУНГ з метою апробації методу локалізації витоків з технологічних трубопроводів в польових умовах.

Обладнання для проведення польових досліджень: польовий трубопровід  $\varnothing 150$  мм довжиною 172 м, розгорнутий на полігоні кафедри військової підготовки (рис. 1); модуль випромінювача коливань (генератор імпульсів, який розроблений на базі головки звуковідтворювальної електродинамічної НД 240), змонтований в патрубку довжиною  $l_g = 1$  м і  $\varnothing 150$  мм (рис. 2); модуль імітації витoku, змонтований в трубі довжиною  $l_v = 6$  м і  $\varnothing 150$  мм (насадки для крана-імітатора витoku діаметрами 1, 3, 5 та 10 мм); модуль генерування та реєстрації сигналів – EOM (Celeron 1,5 ГГц, 1024 Мб RAM, 24 бітова звукова карта ESI Juli@ з частотою дискретизації вимірюваного сигналу 192 кГц, ОС Windows XP); підсилювач Radiotekhnika У-101 (номінальна вихідна потужність при навантаженні 4 Ом – 20 Вт на канал, відтворювані частоти 20-20000 Гц, споживана потужність не більше 80 Вт, напруга живлення 220В +10%); повітряно-компресорна пересувна станція ЗИФ-55В з гвинтовим компресором.

Порядок проведених експериментів був наступний:

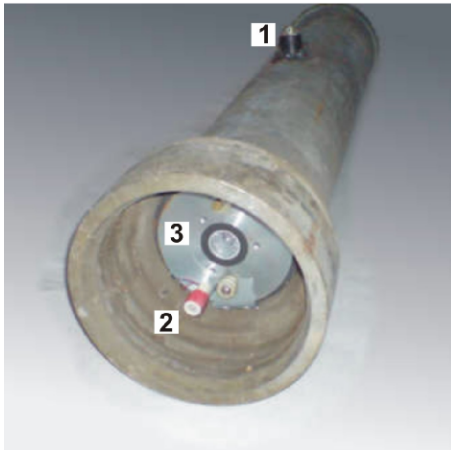
п.1 провели монтажні роботи по приєднанню випромінюючої вставки (рис. 2) до трубопроводу в точці А; приєднували заглушки до випромінюючої вставки та до кінця трубопроводу згідно схеми, зображеної на рис. 1; провели герметизацію трубопроводу до встановлення тиску в трубопроводі на рівні 0,16 МПа, після чого зупинили подачу повітря в трубопровід і, після контролю встановленого тиску, здійснювали реєстрацію сигналів, генерованих випромінюючою вставкою в герметизованому трубопроводі. Такий експеримент необхідний для визначення імпульсної характеристики трубопроводу за відсутності витоків;

п.2 після розгерметизації трубопроводу провели монтажні роботи по заміні ділянки С (рис. 1) на 6-ти метрову вставку з імітатором витoku (рис. 3, б). Встановлювали кран-імітатор витoku в режим «закрито»; проводили роботи по п.1, після чого здійснювали реєстрацію сигналів, генерованих випромінюючою вставкою в герметизованому трубопроводі з встановленим діаметром витoku на крані-імітаторі розміром 1 мм. Аналогічно проводили експерименти для діаметрів витoku 3, 5 і 10 мм. Потім проводили заміну місця встановлення 6-ти метрової ділянки труби з імітатором витoku в інших місцях трубопроводу згідно наведеної на рис. 1 схеми і повторювали експерименти.



А, В – точки підключення вставки для генерування та реєстрації імпульсів; М – манометр; С, D та Е – ділянки, які підлягають заміні на ділянку з вмонтованим імітатором витoku

**Рисунок 1 – Схематичне зображення трубопроводу  $\varnothing 150$  мм, розгорнутого на полігоні кафедри ВП ІФНТУНГ**



1 – точка підключення динаміка та мікрофона;  
2 – мікрофон; 3 – динамік

**Рисунок 2 – Вставка для генерування і реєстрації сигналів в трубопроводі  $\varnothing$  150 мм**



а)

б)

а) – система генерування та реєстрації сигналів, б) – модуль імітації витоку

**Рисунок 3 – Апаратне забезпечення проведення експериментальних досліджень на технологічному трубопроводі**

Підключене розроблене апаратне забезпечення до польового трубопроводу для проведення експериментальних досліджень представлено на рис. 3. Отримання відбитих сигналів від неоднорідностей трубопроводу проводилось одним і двома первинними перетворювачами, в якості яких використовувались мікрофони МКЭ-3. Попередніми експериментами було встановлено, що для більш точної локалізації неоднорідностей по довжині трубопроводу необхідно використати два давачі. Збільшення точності встановлення відстані до неоднорідності проводиться шляхом визначення швидкості поширення звуку в повітрі, яке

заповнює трубопровід, на основі взаємкореляційної функції сигналів, зареєстрованих двома мікрофонами, та відомої відстані між мікрофонами. Тому при проведенні експериментальних досліджень додатковий мікрофон було змонтовано у вставці генерування на відстані 0,442 м від мікрофону 2 (рис. 2).

Процедура визначення координати витоку проводиться за наступним алгоритмом.

1. Визначають уточнену величину швидкості поширення акустичних коливань (звуковий діапазон) в середовищі повітря, що транспортується, для визначених умов за формулою [7]:

$$c_m(T) = \frac{c(T)}{\sqrt{1 + \frac{D}{\delta} \frac{B}{E}}}, \quad (1)$$

де  $c_m(T)$  – швидкість поширення коливань в повітрі, яке транспортується трубопроводом як функція температури  $T$ ;  $c(T)$  – швидкість поширення коливань в необмеженому середовищі повітря;  $D$  – зовнішній діаметр трубопроводу;  $c = c_m(T)$ ;  $B = c^2 \rho$ ;  $\rho$  – густина середовища;  $E$  – модуль пружності матеріалу труби;  $\delta$  – товщина стінки труби.

2. Визначають критичне значення частоти генерування тестових хвиль, яке є верхньою межею діапазону частот  $0 \dots f_{кр}$ , при яких у повітрі, яке заповнює трубопровід можуть розповсюджуватись тільки однорідні плоскі хвилі [8]:

$$f_{кр} = 0,61c/r, \quad (2)$$

де  $f_{кр}$  – критичне значення частоти,  $r$  – радіус трубопроводу.

3. Визначають величину коефіцієнта  $\beta$  загасання звукових коливань [8]:

$$\beta = \frac{b\omega^2}{2c^3\rho} + \frac{1}{a} \left[ \frac{\eta\omega}{2c^2\rho} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

де  $b = \frac{4}{3}\eta + \xi$ ,  $\eta$  – динамічна (зсувна) в'язкість повітря, Па·с;  $\xi$  – кінематична (об'ємна) в'язкість повітря;  $\omega = 2\pi f$  – циклічна частота,  $s^{-1}$ ;  $a$  – характерний розмір труби (для круглого перерізу труби дорівнює її радіусу  $r$ ). Обчислення максимальної дальності сканування

трубопроводу на основі визначеного коефіцієнта згасання коливань за (3).

5. Генерування тестового сигналу проводять на основі алгоритму завадостійкого кодування (Баркер, ЛЧМ, М-послідовність). Тривалість сформованого тестового сигналу обмежується необхідною мінімальною дальністю дії  $D_{min}$ , тобто мінімальною відстанню, починаючи з якої можливе спостереження відбитого імпульсу. Тривалість сформованого сигналу визначається так:

$$\tau = 2D_{min} / c - t_g, \quad (4)$$

де  $t_g$  - час відновлення чутливості приймача.

6. Проводять генерування коливань в середовищі транспортування трубопроводу та реєстрування відбитих сигналів від неоднорідностей технічними засобами системи локалізації витоків (рис. 2). У випадку значного рівня зашумлення прийнятого сигналу за допомогою програмно реалізованого алгоритму адаптивного фільтрування методами LMS (Least Mean Square, метод найменших квадратів МНК) і RLS (Recursive Least Square, рекурсивний метод найменших квадратів РНК) здійснюють виділення корисних сигналів. За умов використання двох датчиків проводять повторне визначення швидкості поширення акустичних коливань на основі максимуму взаємкореляційної функції сигналів, які реєструються двома мікрофонами, і відомої відстані їх розміщення у вставці генерування.

7. Обчислюють взаємкореляційну функцію тестового сигналу і відфільтрованого – формування імпульсної характеристики трубопроводу.

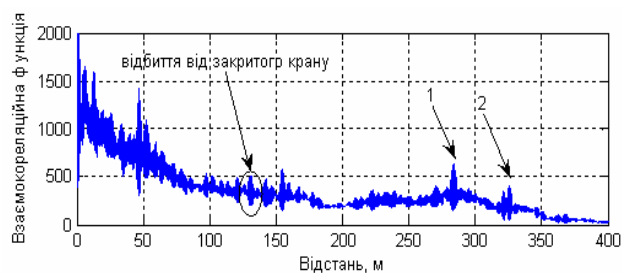
8. Визначають відстань між локальними максимумами одержаної взаємкореляційної функції за часом  $\Delta T$ , що встановлюється з взаємкореляційної функції тестового сигналу і сигналу-відгуку:

$$L = c\Delta T / 2. \quad (5)$$

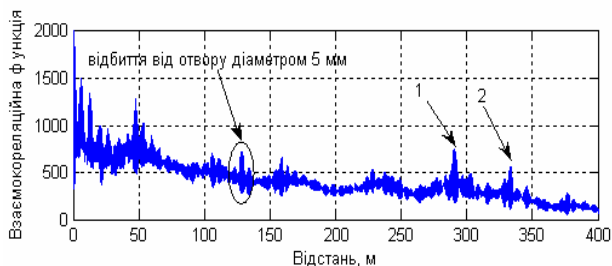
Безпосередньо виявлення витоків проводять двома шляхами: в залежності від відомостей про компоновку трубопроводу; наявності еталонної імпульсної характеристики трубопроводу. В першому випадку з розгляду локальних максимумів одержаної імпульсної характеристики усувають ті, які знаходяться на відстанях, що відповідають місцям встановлення кранів, різких відведень, запірної арматури і т.д. (місцеві неоднорідності ділянки трубопроводу). Координати локальних максимумів імпульсної характеристики, що

залишилися, відповідають місцям появи витоків. За умови наявності імпульсної характеристики трубопроводу для випадку відсутності витоків (еталонної) проводиться попереднє нормування та віднімання еталонної імпульсної характеристики від реєстрованої. Місця локальних максимумів різницевої імпульсної характеристики ідентифікують зміну стану трубопроводу – появу витоків.

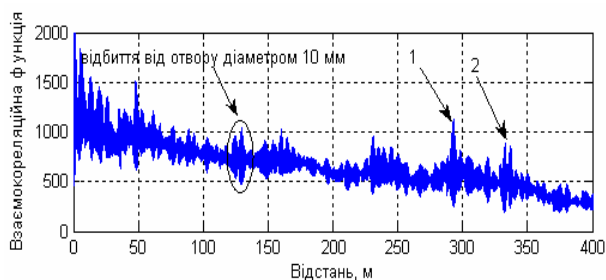
На рис. 4 представлені взаємкореляційні функції реєстрованих сигналів для випадків закритого крану-імітатора витоку та для випадку встановлення насадки для імітації витоку  $\varnothing 5$  та 10 мм.



а)



б)

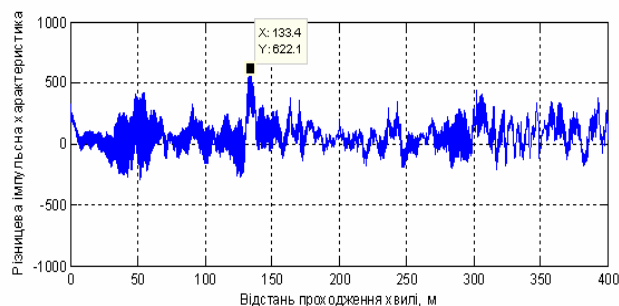


в)

1 – місце розміщення вставки-вловлювача; 2 – місце розміщення відводу для нагнітання тиску в трубовід

**Рисунок 4 – Взаємкореляційні функції реєстрованих сигналів двома мікрофонами для випадків: кран закритий (а), відкритий кран з насадкою для витоку  $\varnothing 5$  мм (б) та  $\varnothing 10$  мм (в)**

Неоднорідностями для даного технологічного трубопроводу є місце встановлення крана-імітатора витоку (і його стан – відкритий (визначається діаметром насадки) або закритий), місце встановлення вставки-вловлювача (поз. 1 на рис. 4), місце встановлення відводу для нагнітання тиску компресором (поз. 2 на рис. 4) та місця згину трубопроводу згідно його конфігурації. Після проведення процедури нормування та віднімання імпульсних характеристик трубопроводу для двох станів – закритий кран-імітатор витоку та відкритий з відомим діаметром отвору насадки ( $\varnothing$  3мм) відокремлюють амплітуду сигналу, відбитого від витоку, від інших сигналів-відгуків, які ідентифікують місця розміщення неоднорідностей стінок трубопроводу.



**Рисунок 5 – Різниця характеристика трубопроводу, одержана для випадку наявності в трубопроводі витоку  $\varnothing$  3 мм**

## ВИСНОВКИ

Експериментально встановлена достатня чутливість методу для реалізації зворотної задачі: за значенням амплітуди локальних максимумів взаємкореляційної функції тестового та реєстрованого акустичних сигналів кількісно оцінити місце розміщення неоднорідностей.

Визначення місця наявності витоку рекомендується проводити за різницевою імпульсною характеристикою трубопроводу, яку одержують шляхом віднімання імпульсної характеристики трубопроводу від еталонної, виміряної за відсутності витоків в трубопроводі.

Більшу точність локалізації витоку

забезпечує введення до складу системи на відомій відстані від точки генерування додаткового мікрофону, який дозволяє за максимумом взаємкореляційної функції реєстрованих сигналів двома перетворювачами акустичних коливань визначити уточнену швидкість поширення акустичних коливань в середовищі транспортування.

*1 Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / [В.В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А.В Ковалев и др]; под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с. 2 Pat. 4543817 United State, Int. Cl. G 01 M 3/24, F 17 D 5/00, F 17 D 5/06. Method of detecting a leakage of fluid / S. Sakae. - Application No. 06/480787; filed on 03/31/1983; Issued on 10/0 1/ 1985. 3 Пат. 1707429 A1 SU, МПК F 17 D5/02. Способ определения места утечки жидкости из трубопровода / Белкин А.П., Спасенов В.Я. - №4744740/29; заявл. 03.10.89; опубл. 23.01.92, Бюл. №3. 4 Пат. 2197679 C2 Российская Федерация, МПК F 17 D5/02. Способ определения мест утечки жидкости из трубопровода / Галиакбаров В.Ф., Гольянов А.А., Коробков Г.Е. - №2001108766/06; заявл. 03.04.2001; опубл. 27.01.2003. 5 Пат. 83290 UA, МПК G 01 N 29/04, G 01 M 3/24. Спосіб локалізації місця витоку речовини з трубопроводу та система для його здійснення / Замиховський Л.М., Ровінський В.А., Штаєр Л.О. - № a200610331; заявл. 28.09.06; опубл. 25.06.08, Бюл. № 12. 6 Замиховський Л. М. Дослідження впливу неоднорідностей стінок трубопроводу на інформативність діагностичних сигналів в його середовищі / Л.М.Замиховський, Л.О.Штаєр // «Наукові вісті» Галицької Академії. – Івано-Франківськ, 2009. – № 15(1). – С. 21-28. 7 Исакович М. А. Общая акустика / М.А. Исакович. – М.: Изд-во «Наука», 1973. – 496 с. 8 Красильников В. А. Введение в акустику /В.А. Красильников – М.: Изд-во МГУ, 1992. – 152 с.*

**Поступила в редакцію 08.04.2010 р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Горбійчук М.І.**